

Marko KATALINIĆ, Pomorski fakultet u Splitu, Zrinsko Frankopanska 38, HR-21000 Split, Hrvatska, marko.katalinic@pfst.hr
Joško PARUNOV, Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, I. Lučića 5, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, jparunov@fsb.hr

PREGLED KLIMATSKIH PRILIKA U JADRANSKOM MORU

Sažetak

Rad daje pregled klimatski prilika, poglavito vjetra i vjetrovnih valova, na Jadranskom moru na temelju podataka dostupnih u stručnoj literaturi. Smješten centralno u sjevernom dijelu Mediteranskog mora Jadran ima specifičnu klimu s obzirom da je omeđen kopnom s tri strane te smješten između dva paralelna planinska masiva (Apenini i Dinaridi). Dvije dominantne klimatske pojave, vjetrovi bure i juga, posebno su razmatrani. Jadransko more strateški je važan resurs okolnim zemljama u područjima brodogradnje, pomorstva, eksploatacije zaliha fosilnih goriva, nautičkog turizma, marikulture i ribarstva, te eventualno kao obnovljivi izvor energije. Informacije o klimatskim prilikama mogu služiti u svrhu planiranja i upravljanja u istima.

Ključne riječi: Jadran, klima, vjetrovni valovi, jugo, bura

REVIEW OF CLIMATIC CONDITIONS IN THE ADRIATIC SEA

Abstract

The paper gives a review of climatic conditions, especially wind and wind waves, in the Adriatic Sea, available in literature. Located in the central, north, part of the Mediterranean Sea, the Adriatic has a specific climate being a three-side enclosed basin and stretching between two parallel mountain ranges (the Apennines and the Dinarides). Two dominant climatic events, winds Bura (*ital. Bora*) and Jugo (*ital. Sirocco*), are specially considered. The Adriatic Sea is a strategically important resource to the surrounding countries in the fields of shipbuilding, maritime shipping, offshore resources, nautical tourism, mariculture and fishing, and eventually as a renewable energy source. The information about its climatic conditions can serve as basis for their planning and management.

Keywords: Adriatic, climate, wind waves, bura, jugo

1. Uvod

Jadransko more predstavlja važan resurs za zemlje koje ga okružuju. U svrhu kvalitetne, sigurne i dugoročno održive eksploatacije u gospodarskim sektorima koji ovise o Jadranu nužno je poznavanje njegove klime. Za sektore brodogradnje, pomorstva, ribarstva, marikulture i nautičkog turizma te sektora eksploatacije fosilnih goriva i potencijalno obnovljivih izvora energije, vrlo je važno poznavanje prilika vjetrovnih valova, što je tema ovog rada. Vjetrovni valovi na Jadranu uvjetovani su njegovim smještajem globalno, ali dominirani lokanim geografskim značajkama budući da se radi o relativno zatvorenom morskom bazenu.

Osim vjetrovnih valova, treba spomenuti da su na Jadranu kroz povijest zabilježeni i događaji seizmičkih morskih valova (tsunamija) i stojnih valova čije su posljedice značanije za obalne građevine i konstrukcije za razliku od vjetrovnih valova čiji je utjecaj dominantan na moru, u plovidbi ili sidrenim pomorskim objektima.

Tradicija brodogradnje i pomorstva na istočnoj i zapadnoj obali Jadranskog mora razvila se u modernom obliku do globalne razine i nije nužno ograničena na lokalnim okvirima. Ipak, osim što ove djelatnosti vuku svoju tradiciju u lokalnoj plovidbi i gradnji, njihovi suvremene izazove na Jadranu predstavljaju putnički brodovi linijskog tipa ili za krstarenja, radni brodovi različitih namjena izdvajajući ribarske i opskrbe brodove, ophodni brodovi obalne straže, policijske ili vojne namjene, te brodice i jahte za nautički turizam. Poznavanje tipičnih i ekstremnih stanja mora bitni su parametar za kvalitetno projektiranje i eksploataciju navedenih tipova brodova. Nadalje, na ulazne parametre klimatoloških prilika Jadrana oslanja se marikulturni sektor pri odabiru radnih brodova i sidrenju plutajućih objekata i uzgajališta. Nautički sektor ovisi o kvalitetnim kratkoročnim prognozama stanja mora za sigurnost plovidbe. Što se energetskog sektora tiče, u skladu s trendom razvoja opravdano je očekivati u budućnosti pučinske instalacije za generatore pokretane energijom valova ili vjetra, dok su pučinski objekti za eksploataciju zaliha plina i nafte već prisutni na zapadnom i sjevernom dijelu s naznakama širenja na istočni Jadran. Ovi objekti moraju biti projektirani u skladu s ekstremnim stanjima mora u povratnom periodu svog radnog vijeka.

Vjetrovne prilike na Jadranskom moru dane su na osnovi pregleda literature te posebno statističkom obradom podataka o zabilježenim stanjima mora sa velikog broja brodova sakupljenih od strane Hidrografskog instituta Republike Hrvatske po prostornim kvadrantima Jadranskog akvatorija.

2. Značajke Jadranskog mora koje utječu na površinske vjetrovne valove

Općenito, Jadran je pod utjecajem mediteranske klime (podtip Csa – Mediteranska klima sa suhim i vrućim ljetima^[1]), u skladu s položajem u sjevernom Mediteranu.



Slika 6. Jadransko more. Izvor: Google Maps

U kontekstu stvaranja vjetrovnih valova potrebno je razmotriti glavne značajke dominantnih vjetrova i privjetrišta na kojem pušu. Dominantnim vjetrovima, u skladu s intezitetom i trajanjem na

Jadranu smatraju se vjetrovi *bura*, *jugo*, te *lebić*^[2] i *tramuntana*, uglavnom u zimskim mjesecima, dok je u ljetnim mjesecima za plovību važan i *maestral* zbog učestalosti i predviđivosti.

Površina Jadranskog mora iznosi 138,595 km² (oko 4.6% Mediteranskog mora). Omeđen je kopnom s tri strane, što graničava razvijanje valova, te na jugoistoku spojen Otrantskim vratima sa ostatkom Mediteranskog mora. Pravokutnog je oblika protežući se od sjeverozapada prema jugoistoku, NW-SE (strane svijeta dalje u tekstu prema *engl.* kraticama sjever – N, jug – S, istok – E, zapad – W), smješten između Apeninskog (W) i Dinarskog (E) planinskog masiva.

Bura (N-NE to E-NE) je anticiklonalni atmosferski poremećaj. Vjetar najjačeg inteziteta na Jadranu (rekordna izmjerena brzina preko 65 m/s, vidi Peljar za male brodove, HHI). Puše poprečno preko Jadrana, ubrzavajući preko Dinarskog gorja prema zapadnoj obali koja joj ograničava privjetrište na kojem razvija valove na otprilike 100-tinjak kilometara. Intezitet i smjer vjetra, te posljedični valovi, lokalno su određeni topografijom gorja na istočnoj obali. Najveći površinski valovi uslijed puhanja *bure* razvijaju se pred zapadnom obalom središnjeg Jadrana postižući maksimalne valne visine od 6.2 do 7.2 metara (Peljar za male brodove, HHI). *Bura* je tip vjetra koji puše na udare, čime dodatno otežava uvijete plovību. Rijetko traje duže od neokliko dana.

Jugo (E-SE to SS-E) puše duž Jadranskog mora. Dostiže manje brzine od *bure* (cca 30 m/s) i obično puše 2-3 dana prije nego razvije maksimalnu brzinu vjetra što omogućava razvijanje većih i dužih valova koji već formirani ulaze kroz Otrantska vrata.

U skladu s navedenim vidljivo je se na Jadranu javljaju vjetrovi znatnog inteziteta, ali ograničeni trajanjem i privjetrištem. Tako je pokazano da uopćena relacija za odnos visine i duljine vala, uvriježena u pomorskom svijetu, poprima na Jadranu manji iznos^[3]:

$$H : \lambda = 1 : 15 \rightarrow H : \lambda = 1 : 12.5$$

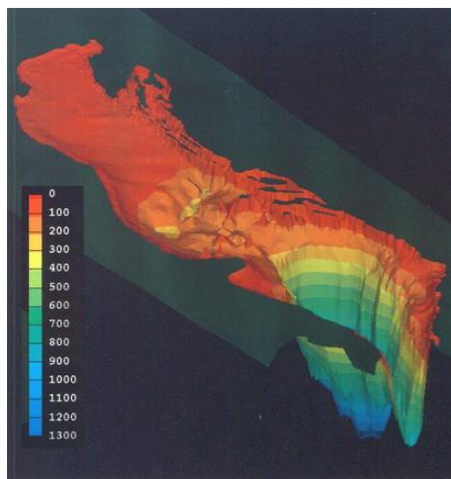
Kraći valovi dokaz su da vjetrovna stanja mora na Jadranu teže postižu razvijeni oblik.

Osim navedenih, na Jadranu se javljaju još i vjetrovi *oštro* (S), *lebić*, *garbin* (SW), *punenat* (W), *tramontana* (N to NW), *levanat* (E), te obalne cirkulacije *burin* (povjetarac s kopna) i *zmorac* (povjetarac s mora). Maestral, kao učestali ljetni vjetar, nastaje uslijed zajedničkog strujanja jednog dijela obalne cirkulacije (smorca) i stalnog visinskog sjeverozapadnog vjetra. Pojavljuje se u prosjeku u 50% dana tijekom ljetnih mjeseci, umjerene snage te također uvelike ovisi o lokalnoj konfiguraciji terena[14].



Slika 2. Vjetrovi Jadrana

Na smjer i oblik valova u Jadranskom bazenu utječu i otoci, brojni na istočnoj strani, te batimetrija (topografija dna) zbog relativno malih dubina.



Slika 3. Batimetrija Jadrana. Izvor: <http://engineering.dartmouth.edu/adriatic/index.html>

Preko 2/3 dna dubine su manje od 200 metara. Najpliće je područje sjevernog Jadrana, dok je najdublje područje kotline u južnom Jadranu gdje su dubine veće od 1200 metara.

3. Spektar valova za Jadransko more

Specifičnosti valova na Jadranu istraživao je i prikaza Tabain^[4] u obliku jedno-parametarske jednadžbe spectra valova:

$$S_{\eta} = 0.862 \frac{0.0135g^2}{\omega^5} e^{-\left(\frac{5.186}{\omega^4 H_S^2}\right)} 1.63^p \quad (2)$$

gdje je

$$p = e^{-((\omega - \omega_m)^2 / 2\sigma^2 \omega_m^2)}; \quad \omega_m = 0.32 + \frac{1.8}{H_S + 0.60}$$

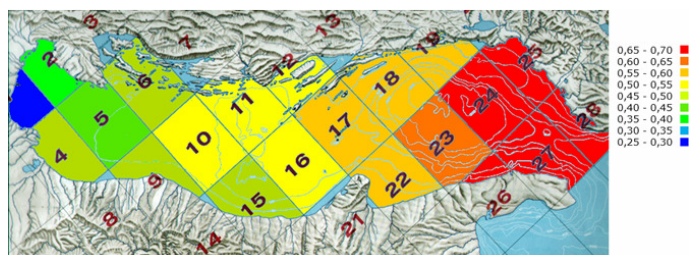
$$\sigma = 0.08 \text{ for } \omega \leq \omega_m; \quad \sigma = 0.1 \text{ for } \omega \geq \omega_m$$

4. Baza brodskih opažanja Hrvatskog hidrografskog instituta (HHI)

Istražujući stanja mora Hrvatski hidrografski institut sakupio bazu zabilježenih stanja mora sa trgovačkih i istraživačkih brodova u Jadranu u period od 1957 – 1971 godine. Baza je obrađena i publicirana u grafičkom obliku (“ruža valova”) u publikaciji Klimatološki Atlas Jadranskog mora^[5]. Sadrži 43 274 kompleta metereoloških zabilješki uključujući značajne i maksimalne valne visine, njihov smjer i period te smjer i brzinu vjetra.

Podaci su sortirani po prostornim kvadrantima Jadranskog mora dimenzija 1° geografske širine x 1° geografske dužine. Ukupno 28 ovakvih kvadranta pokriva područje Jadrana.

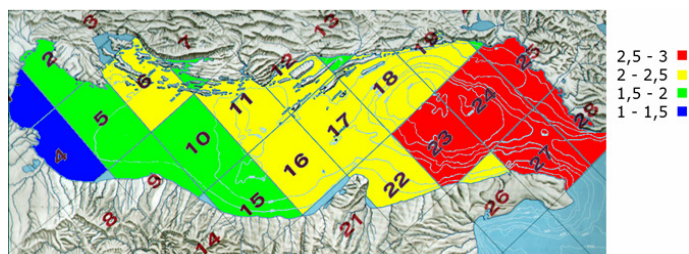
Daljnja statistička obrada podataka iz Klimatološkog Atlasa daje u grafičkom prikazu srednje godišnje vrijednosti značajnih valnih visina^[6] (Slika 4.):



Slika 4. Srednja godišnja značajna valna visina po kvadrantu u Jadranskom moru, m

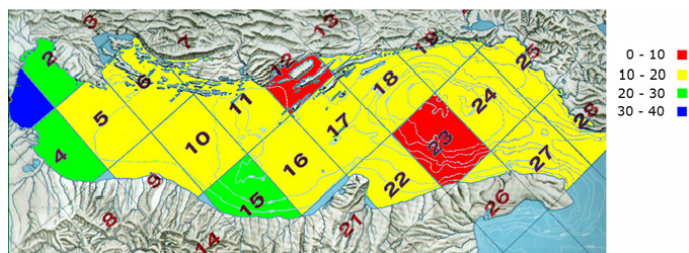
Iz Slike 4. vidljivo je da je srednja godišnja značajna valna visina maksimalna u južnom Jadranu i iznosi 0.65 – 0.7 metara. Približne vrijednosti potvrđuju i Queffeulou & Bentamy^[7] koji na osnovi satelitskih mjerenja (154,424 mjerenja tijekom 1992-2005) daju značajnu valnu visinu za Jadransko more od 0.85 metara dok je 80% zabilježenih podataka manje od 1.1 metar.

Srednje godišnje vrijednosti brzine vjetra (Slika 5.):



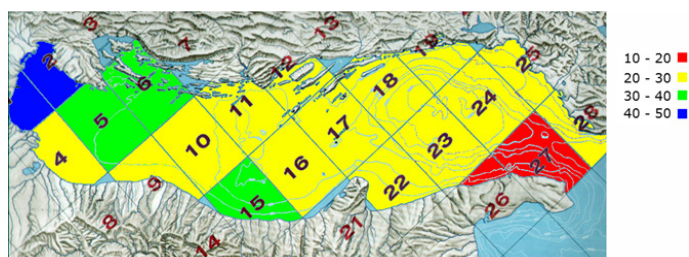
Slika 5. Srednja godišnja brzina vjetra po kvadrantu u Jadranskom moru, Beaufort, Bf

Usporedba Slika 4. i 5. pokazuje očekivanu korelaciju brzine vjetra visine valova. Postotak vremena bez vjetra (Slika 6):



Slika 6. Postotak vremena bez vjetra u Jadranskom moru, %

Postotak vremena bez valova (bonaca) (Slika 7.):



Slika 7. Postotak vremena bez valova (bonaca) u Jadranskom moru, %

Međutim, iz podataka Klimatološkog Atlasa nije moguće donijeti zaključke za ekstremne stanja mora jer su podaci valovima iznad 4 metra od strane HHI bili odbačeni kao nepouzdaniji.

5. Ekstremna stanja mora

Mjerenja i analize pokazuju da su znatno viša stanja mora od značajne valne visine od 4 metra moguća u Jadranskom moru. Tablica podjele stanja mora prema učestalosti prema Pomorskoj enciklopediji^[9] za Jadransko more dalje sljedeće vrijednosti valnih visina, perioda i duljina:

Tablica 3. Ljestvica stanja mora na Jadranu. Izvor: Pomorska enciklopedija

| Jadran | WMO | H | T | λ | % |
|--------|-----|------|------|-----------|------|
| 0 | 0 | - | - | - | 10 |
| 1 | 1 | 0,05 | 1,6 | 2 | 24,6 |
| 2 | 2 | 0,2 | 2,7 | 5 | |
| 3 | 3 | 0,5 | 3,7 | 9,5 | |
| 4 | | 0,8 | 4,6 | 14 | 43,0 |
| 5 | 4 | 1,3 | 5,4 | 20 | |
| 6 | | 1,9 | 6,2 | 25 | 17,2 |
| 7 | 5 | 2,6 | 6,9 | 32 | |
| 8 | | 3,5 | 7,6 | 39 | 4,2 |
| 9 | 6 | 4,6 | 8,3 | 46,5 | |
| 10 | | 5,9 | 9,0 | 55 | 1,0 |
| 11 | 7 | 7,3 | 9,7 | 66 | |
| 12 | | 8,8 | 10,4 | 79 | 0,01 |

Prema Tablici 1. vidljivo je da u 1% najviših stanja mora značajne valne visine variraju između 4.6 – 8.8 metara.

Navedene vrijednosti slažu se s analizom značajnih vrijednosti stanja mora s radom Leder^[10] u kojem je primjenom teorije ekstrema na osnovu mjernih podataka stanja mora sa plinskih platform IVANA, IKA, AMANDA I i II izračunata maksimalna značajna valna visina od 8.57 metara (maksimalna valna visina 13.54 metra) za sjeverni Jadran u povratnom period od 100 godina. Leder u svom radu navodi kako najveće značajne valne visine mogu očekivati u zimskim mjesecima, od prosinca do veljače.

Najveći val izmjeren na Jadranu zabilježene je sa platform u sjevernom Jadranu 1986. godine i imao je valnu visinu od 10.8 metara^[11]

6. Rasprava i zaključak

Poznavanje stanja mora određenog akvatorija proizlazi uglavnom obradom podataka sakupljenih mjerenjima. Za potpuno opisati određeno stanje mora potrebno je poznavati značajnu i maksimalnim valnu visinu, srednji period vala, smjer i brzinu vjetra. Najpouzdaniji način za sakupljanje podataka je postavljanjem mjernih plutača ili mjernih instrumenata na pučinskim objektima (platformama), međutim ovi izvori su lokalnog karaktera i nije uvijek jasno koliko je korektno ekstrapolirati ih na šire područje. Podaci o morskim valovima na širem području mogu se sakupljati iz satelita primjermom altimetrije – podaci sakupljeni na ovaj način obično su limitirani (zbog cijene prikupljanja) te pokazuju određenu mjernu grešku pa ih je poželjno kalibrirati in-situ mjerenjima (vidi Queffeulou & Bentamy^[7]). Na kraju moguće je osloniti se na brodska opažanja ali tako prikupljeni podaci ovise o subjektivnosti promatrača te je pokazano da često podcijene

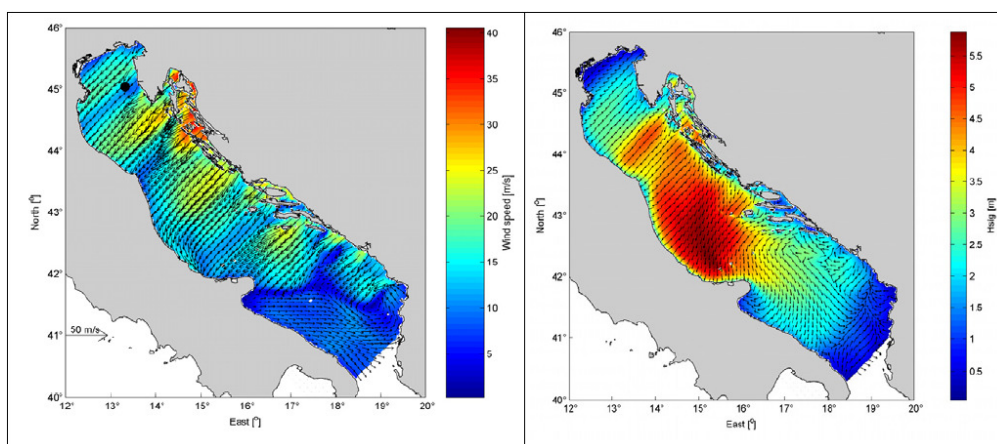
značajnu valnu visinu (vidi Guedes Soares^[15]). Uz to oprezni kapetani izbjegavaju ekstremna stanja mora te je takvih, logično, manje i zabilježeno.

Iz pregleda prilika valova na Jadranskom moru iz postojećih izvora vidljivo je da ne postoji konzistentan pregled stanja mora u svim točkama vremenske i prostorne domene Jadrana na osnovu kojeg bi se pouzdano mogla razmatrati određana ruta ili proizvoljna lokacija u svrhu projektiranja ili eksploatacije brodova ili pučinskih objekata.

Način za odgovoriti na ovaj izazov je primjenom numeričkih simulacijskih alata, čija je primjena etablirana u meteorologiji, kalibriranih i validiranih prema više mjernih lokacija i podataka iz literature. Dapače, postoje, razumno pouzdani, uhodani numerički modeli površinskih morskih valova, pokretani izlaznim podacima numeričkih modela vjetra za duboka mora (npr. oceane), tj. za ona mora čija je dubina dovoljno velika da se može zanemariti utjecaj dna na ponašanje valova. Budući da je Jadran more zatvorenog tipa, relativno plitko i s mnoštvom otoka duž istočne strane bilo bi potrebno primijeniti kompleksniji matematički model za simuliranje svih značajnih efekata.

Plan daljnjeg rada bilo bi primijeniti numerički model valova za plitka mora SWAN (Simulating Waves Near-shore) razvijenog na sveučilištu TU Delft te ga kalibrirati i validirati za područje jadranskog akvatorija. SWAN u osnovi rješava jednadžbu spektra gustoće akcije valova^[12] te uključuje sljedeće efekte: vremensku i prostornu propagaciju valova, refrakciju zbog dubine i morskih struja, promjenu frekvencije uslijed nestacionarne dubine, generiranje valova vjetrom, tri- i četiri-valnu interakciju, lomljenje valova, disipaciju energije, prolaz kroz i refleksiju od prepreka te difrakciju.

U literaturi (Janeković&Tudor^[13]) je dostupan primjer primjene ovog modela na područje Jadrana prilikom puhanja *bure* zabilježene 2004. Godine. Rezultati su, uspoređeni sa dostupnim mjerenjima na lokaciji u sjevernom Jadranu, pokazali zadovoljavajuću točnost.



Slika 8. Primjer rezultata numeričke prognoze valova za Jadran primjermom SWAN modela

Zahvale

Autori se zahvaljuju studentima Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu: Filip Aralica, Marko Čakširan, Antonio Filipović, Nenad Kosanović, Luka Olrom; koji su svojim radom i entuzijazmom pridonijeli izradi ovog rada.

Ovaj rad je sufinancirala Hrvatska zaklada za znanost projektom 8658.

Literatura

- [1] FAVRO, S., SAGANIĆ, I.: "Prirodna obilježja hrvatskog litoralnog prostora kao komparativna prednost za razvoj nautičkog turizma", *Geoadria* vol.12 No.1 (2007), p.59-81
- [2] POPOVIĆ, R., KOMADINA, P.: "Windwave regime in the port of Split", *Proceedings of 6th International Maritime Conference*, 2014, p.279-288
- [3] ZOROVIĆ, D., MOHOVIĆ, R., MOHOVIĆ, Đ.: "Towards determining the length of the wind waves in the Adriatic Sea", *Naše more*, 50 (3-4) (2003), p.145-150
- [4] TABAIN, T.: "Standard wind wave spectrum for the Adriatic Sea revisited", *Brodogradnja* 45 (4) (1997), p.303–313.
- [5] ...: Hidrografski institut Republike Hrvatske, "Klimatološki Atlas Jadranskog mora", 1979
- [6] KATALINIĆ, M., ČORAK, M., PARUNOV, J.: "Analysis of wave heights and wind speeds in the Adriatic Sea", submitted for MARTECH 2014 - 2nd International Conference on Maritime Technology and Engineering
- [7] QUEFFEULOU, P., BENTAMY, A.: "Analysis of wave height variability using altimeter measurements: application to the Mediterranean Sea", *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 24 (12) (2007), p.2078–2092.
- [8] ...: Hidrografski institut Republike Hrvatske, "Peljar za male brodove", 2002, ISBN 953-6165-25-2
- [9] ...: Leksikografski zavod Miroslav Krleža, "Pomorska enciklopedija (Jadransko more)", Zagreb, 1976., sv. 3, p. 210
- [10] LEDER N., SMIRČIĆ A., VILIBIĆ I., "Extreme values of surface wave heights in the Northern Adriatic". *Geofizika* 15 (1998), p. 1–13.
- [11] PARUNOV, J., ČORAK, M., PENSA, M.: "Wave height statistics for seakeeping assessment of ships in the Adriatic Sea", *Ocean Engineering*, 38 (2011), p. 1323-1330
- [12] RIS, R.C., BOOJI, N., HOLTHUIJSEN, L.H.: "A third-generation wave model for coastal regions. Part II Verification". *Journal of Geophysical Research*, 104 (1999), p. 7667-7681.
- [13] JANEKOVIĆ, I., TUDOR, M., "The Adriatic Sea wave response to severe Bura wind", *Hrvatski meteorološki časopis* No.40 (2005)
- [14] <http://jadrان.gfz.hr/>
- [15] GUEDES SOARES, C.: "Assessment of the uncertainty in visual observations of wave height", *Ocean Engineering* 13 (1) (1986), p.37–56.